

岡田庸敬*・服部修次**

1. すべり摩擦との複合損傷

例えば、内燃機関のコネクティングロッド軸受のような軸受では、軸と軸受面の接近離反の繰返しによるキャビテーション壊食とすべり摩擦の複合損傷が考えられる。しかし、摩擦に及ぼす壊食の影響は全く明らかになっていないだけでなく、また試験方法も確立していない。著者らは軸受メタルの表面にキャビテーション壊食を発生させた試験片に S 35 C 炭素鋼の円筒形工具の端面を押し付けてすべり摩擦する試験を行なっ

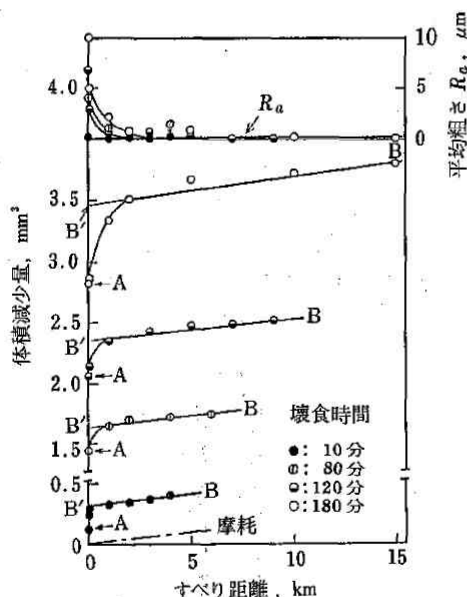


図1 壊食面を摩擦したときの体積減少量と平均粗さの変化〔流動パラフィン中、壊食試験(振幅 $20\ \mu\text{m}$, 共振周波数 $14.5\ \text{kHz}$, すきま $0.5\ \text{mm}$, 摩耗試験(速度 $0.58\ \text{m/s}$, 接触圧力 $1.37\ \text{MPa}$)〕

た^{1,2)}。図1は流動パラフィン中で種々の時間キャビテーション壊食試験を行なった Cu-Pb 合金(ケルメット)の面を摩擦したときのすべり距離に対する摩耗量と損傷面の中心線平均粗さ R_a の変化を示している。図中の \overline{OA} は摩擦面に生じたキャビテーション壊食量を示し、 \overline{AB} はその後のすべり摩耗量を示している。摩擦開始時には摩耗量は大きい、やがて定常摩耗となり、その勾配は摩耗試験のみの摩耗率(図中の一点鎖線)と等しくなる。図に細線で示すように定常摩耗の直線部分を延長して縦軸との交点を B' とすると、 $\overline{AB'}$ はキャビテーションによってもたらされた摩耗の増加量、すなわち摩耗加速量である。キャビテーションにさらされる時間が長くなって壊食量が大きくなるほど摩耗加速量は増大する。

実際の軸受では、図1のような壊食面が摩擦される現象が繰返し発生するか、あるいはその周

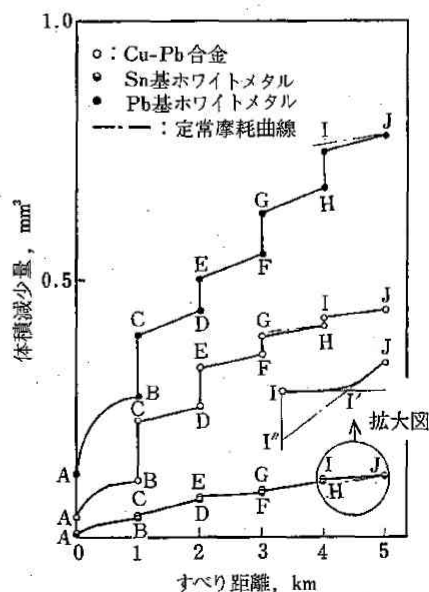


図2 5分間の壊食と摩耗が交互に繰返されたときの軸受材料の体積減少量の変化

* 元 福井大学 工学部 機械工学科
(Tsunenori Okada)

** 福井大学 工学部 機械工学科 (Shuji Hattori)

期が非常に短くなって並列状態に近い状況にあると推察されるので、5分間の壊食試験とすべり距離1 kmの摩耗試験を交互に5回繰り返す試験を行なった。図2はその結果の一例で、図中の \overline{OA} , \overline{BC} , \overline{DE} , \overline{FG} , \overline{HI} はキャビテーション壊食量で、 \overline{AB} , \overline{CD} , \overline{EF} , \overline{GH} , \overline{IJ} は摩擦損失量である。いずれの材料でも摩耗量は1回目の摩擦のとき最も大きく、2回目以降は減少するが、材料によって損傷量に大きな違いがみられる。図1と同様に2回目以降の摩耗試験でも摩耗加速量が計算できる。しかし、キャビテーション損傷量が少ない表面では、模式的に図中に拡大して示すように、1 km 摩擦後に定常摩耗に達していると仮定すると、 I' のような潜伏期間が現われる。ここで、 I' はIを通る水平線とJを通る傾きが定常摩耗率の直線の交点である。Iからの垂線と JI' の延長線の交点を I'' とすると II'' はキャビテーションによって抑制される摩耗抑制量となる。

Cu-Pb 合金, Sn 基ホワイトメタル, Pb 基ホワイトメタルの各軸受メタルについてキャビテーションにさらす時間を30秒から30分の範囲で変化させて同様の試験を行ない、摩擦面での壊食量に対する摩耗加速量もしくは摩耗抑制量の変化を求めてみると、図3、図4、図5のようになる。いずれの軸受メタルでも、摩耗加速量は処女面にキャビテーション壊食が生じたとき最も大きく、2回目以降の摩耗面にキャビテーションが作用した場合には相当減少するが、繰返し回数による差は明瞭でない。また摩耗加速量は壊食量の増加に伴って急増し、やがて壊食量に比例してゆるやか

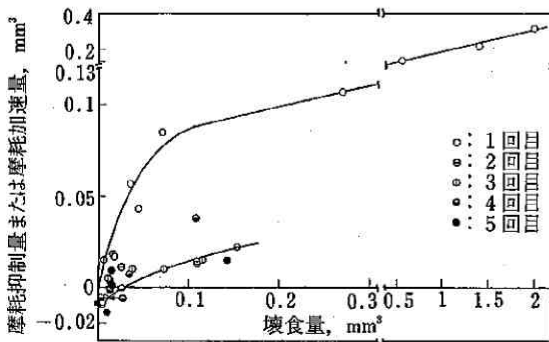


図3 Cu-Pb 合金の壊食量に対する摩耗抑制量または摩耗加速量の変化

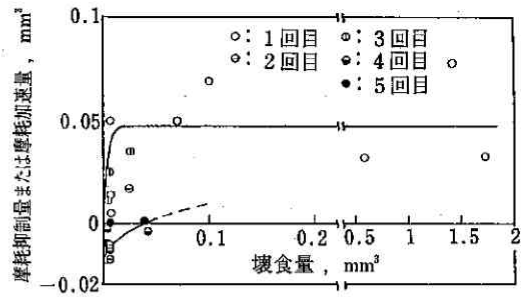


図4 Sn基ホワイトメタルの壊食量に対する摩耗抑制量または摩耗加速量の変化

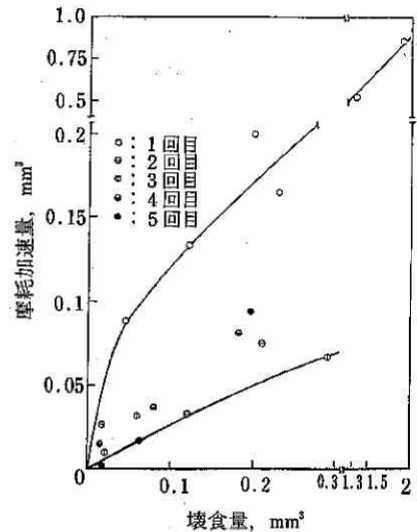


図5 Pb基ホワイトメタルの壊食量に対する摩耗加速量

に増加するが、その程度は材料によって異なる。図5のPb基ホワイトメタルは最も大きな摩耗加速量を示すだけでなく、2回目以降もわずかな壊食量に対しても摩耗は加速される。これに対して、図3のCu-Pb合金と図4のSn基ホワイトメタルでは、2回目以降で壊食量がわずかなになると摩耗が抑制されて潜伏期が現われる。

このような挙動は、キャビテーション気泡崩壊圧の繰返しによる壊食面の変形のしやすさと介在する鉛や硬い β 相(SbSn)の方形結晶の脱落のしやすさに支配されている。これらのホワイトメタルやCu-Pb合金のすべり摩耗試験では、耐摩耗性にほとんど差がみられない¹⁾ことから、キャビテーション壊食と摩耗が重量する軸受の損傷は、壊食被害に加えて摩耗被害まで加速されるた

めに非常に大きくなり、材料間の優劣は各材料の耐摩耗性よりも耐壊食性に大きく依存している。

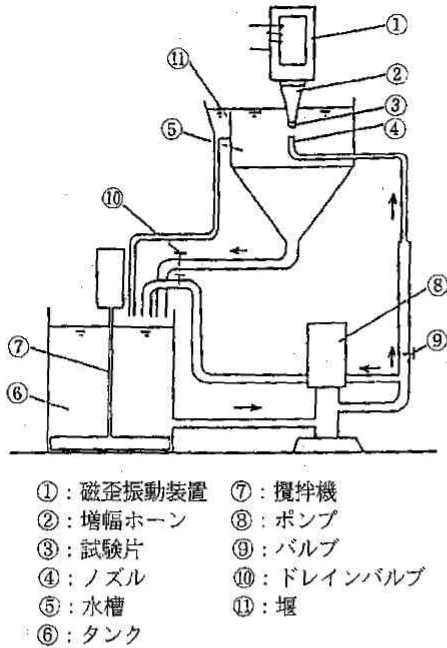


図6 噴射衝突式複合損傷試験

2. スラリー摩耗との複合損傷

土砂を多量に含んだ河川流域で使用される水力機械は激しい壊食にさらされる。これは固体粒子を含んだ水中でのキャビテーション壊食とスラリー摩耗の複合損傷によるものであるが、これに関する研究も非常に少ない。このようなスラリーを含んだ液中でのキャビテーション壊食試験としてしばしばオープンビーカー方式の磁歪振動試験装置でビーカにスラリー液を入れた試験が行なわれている。しかし、この方法では高速流体中の土砂のようにスラリーは運動しないので複合損傷として十分に影響していない。

著者らは、図6のような噴射衝突式複合損傷試験機を完成させてキャビテーション壊食がスラリー摩耗に及ぼす影響について考察した³⁾。試験片は、液中で超音波振動子の増幅ホーンの先端に取り付けられ、それに噴流が直角に衝突するようになっている。試験片は、キャビテーション壊食にさらされながら噴流によってスラリー摩耗も受ける。図7と図8は、この装置を使用して水道水

中にけい砂もしくは黄河の微小流の砂を重量比で3%含有させたスラリー液中で壊食試験を行なったときのSUS 304 ステンレス鋼とS 35 C炭素鋼の5時間後の質量減少量と噴流速度の関係を示している。この装置では清水の噴流が衝突するとキャビテーションクラウドが飛散するので、流速が増加するほどキャビテーション壊食は減少す

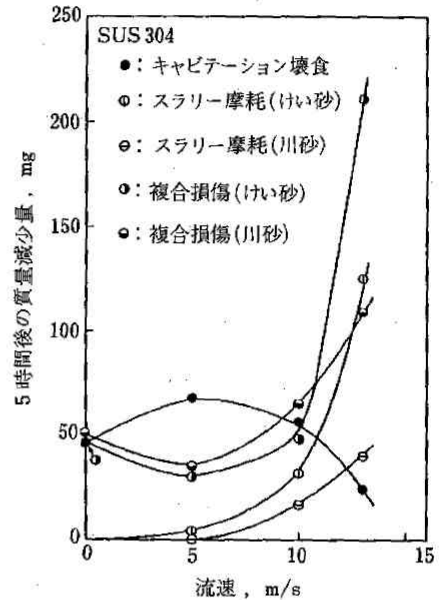


図7 種々な流速での5時間後の質量減少量 (SUS 304)

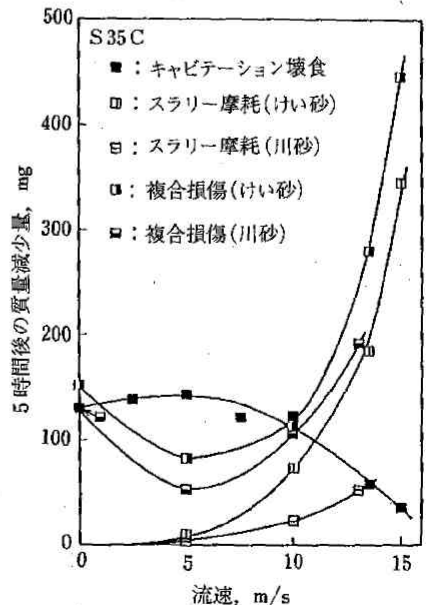


図8 種々な流速での5時間後の質量減少量 (SUS 304)

る。一方、試験片の磁歪振動を静止させて噴流のみが作用するスラリー摩耗では流速の増加とともに壊食量は加速度的に増加する。そこで、キャビテーション壊食が発生している試験面に固体粒子を含んだ噴流を衝突させると、噴流速度の小さい間は壊食面はきれいに研磨されて壊食量はキャビテーション壊食単独の場合よりも小さくなるが、噴流速度が増加すると、極小値を示した後スラ

リー摩耗と同様に増加して、キャビテーション単独の場合よりはるかに大きい壊食量を示す。しかし、スラリー摩耗量との差は縮まる。

図9は5時間後の壊食面の形状である。流速が早くなるとキャビテーション壊食特有の海綿状の壊食面から輝面状の壊食面になりスラリー摩耗による損傷が主流となる。キャビテーション壊食はそれを若干加速させる程度で相対的に影響は小さくなる。キャビテーション壊食で生じた損傷の起点を即座に摩耗してしまうためである。

図10は、流速5, 10, 13 m/sで水道水中のけい砂の濃度（質量パーセント）と5時間後の質量減少量の関係を示したものである⁴⁾。流速5 m/s

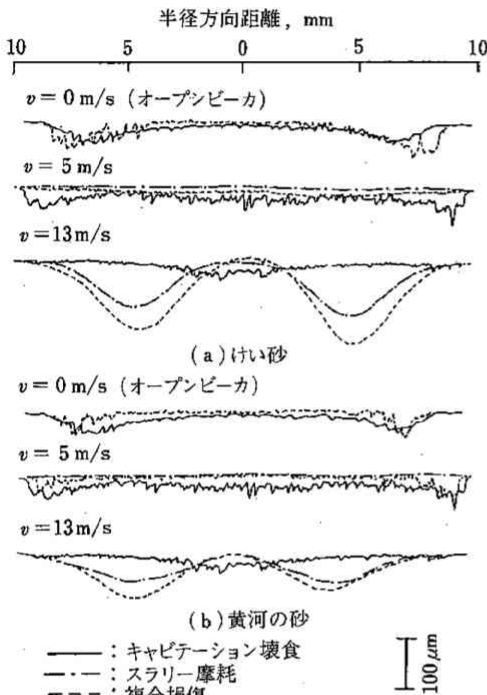


図9 SUS 304 の断面形状

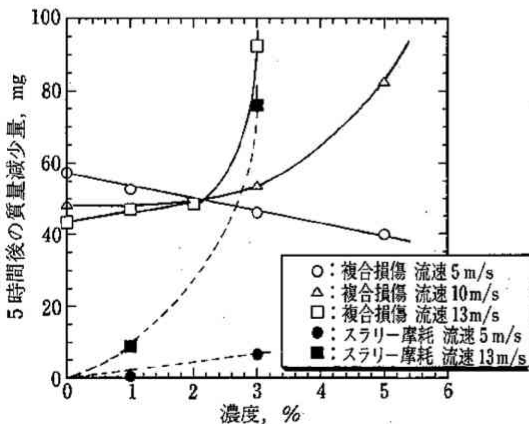


図10 スラリー濃度と5時間後の質量減少量との関係

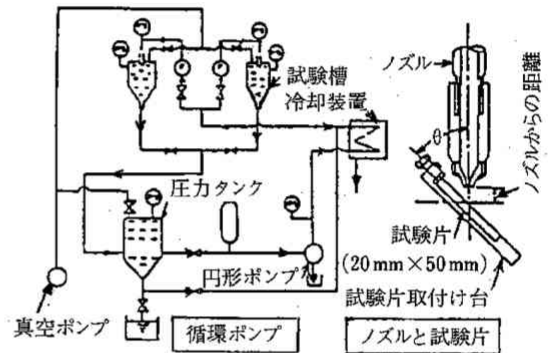


図11 水中噴射実験装置（模式図）

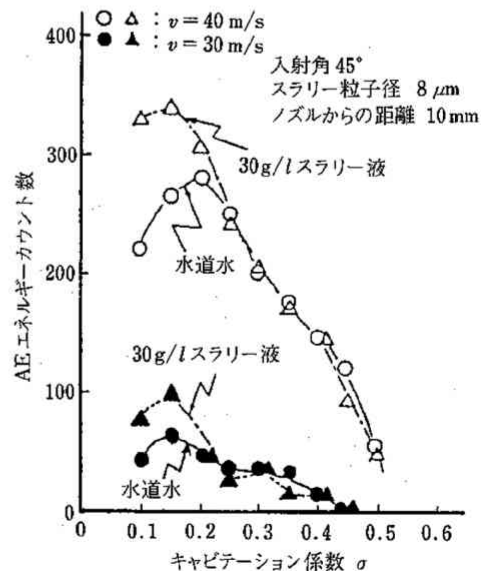


図12 キャビテーション係数 σ とAEエネルギーとの関係

ではけい砂の濃度が増すほど壊食量は漸減傾向にあるが、流速が10 m/sでは3%以上、13 m/sでは2%以上にけい砂が含まれると壊食量は急速に増加する。

図11は、日立製作所で開発された土砂水の水中噴流型実験装置で、真空ポンプに接続された圧力タンク、試験槽、循環ポンプおよび熱交換機から構成されている⁵⁾。試験槽は水で満たされ、内部に噴流ノズルと試験片が取り付けられている。ノズル径は2.1 mm、最大噴流速度40 m/s、衝突角度30°~90°である。噴流のキャビテーション発生は試験槽内の圧力および噴流速度を変えることで調節できる。キャビテーション発生状態を試験片に発生するAEエネルギーで測定してみると

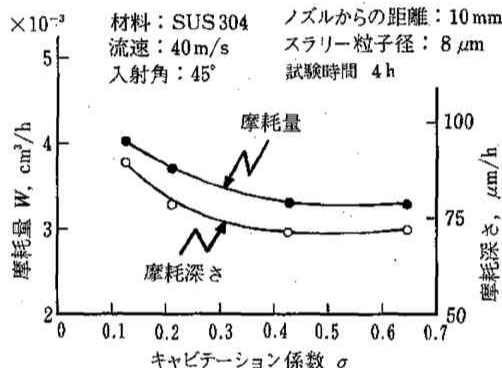


図13 キャビテーション係数 σ と摩耗量、摩耗深さとの関係

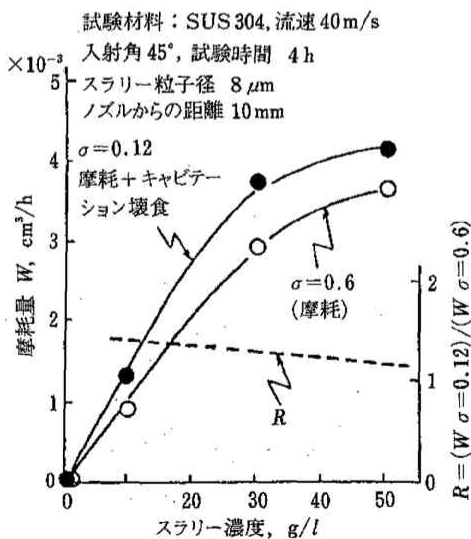


図14 土砂濃度と摩耗量との関係

図12のようになる。キャビテーション係数の減少に伴いAEエネルギーは単調に増加し極大値を示したのち減少する。AEエネルギーが最大となる $\sigma = 0.1 \sim 0.2$ の範囲では清水に比べて土砂水は1.3倍大きい。そのため、キャビテーション係数 σ と摩耗量や摩耗深さの関係も図13に示すように複合損傷の大きい $\sigma = 0.1 \sim 0.2$ で増加している。

図14は土砂濃度と摩耗量の関係を示したものである。 $\sigma = 0.6$ では土砂濃度が0~30 g/lまでは直線的に増加し、それ以上になると増加傾向がゆるやかになる。 $\sigma = 0.12$ の複合損傷でも同じ傾向を示すが、 $\sigma = 0.6$ の場合に比べて1.3倍大きく、キャビテーションにより損傷が加速されていることがわかる。

このようにスラリー摩耗とキャビテーション壊食の複合損傷は流体機械として最も厳しい損傷で今後一層の研究と対策が望まれる。

参考文献

- 1) T. Okada, Y. Iwai and Y. Hoakawa: Proc.JSLE Int. Tribology Conf., July 6~10, Tokyo (1985) p.281; Wear, **110** (1986) p. 331.
- 2) T. Okada and Y. Iwai: ASME/ASLE Trib. Conf. Pittsburgh (1986).
- 3) Q-G. Yuan, Y. Iwai and T. Okada: Proc. 3rd Japan-China Joint Conf. on Fluid Machinery, Osaka, 193 (1990).
- 4) 未発表
- 5) 佐藤・宇佐美・岡村: キャビテーションに関するシンポジウム(第6回), 日本学術会議, 116 (1989).

おわりに

キャビテーション壊食の機構と材料の耐壊食性について、福井大学で多年にわたって行なわれた研究を中心にまとめあげた。全体として未完成の部分も多いが、将来のキャビテーション壊食量の予測と対策の一助になれば幸いである。

終わりに長期にわたって連載していただいた「機械の研究」編集部に感謝致します。また、本稿をまとめるに当たって引用させていただいた多くの論文の著者の方々に心より厚くお礼申し上げます。

(本講座 完結)